

Resne napake v oceni toplogrednega učinka ozračja

Serious Errors in the Assessment of the Atmospheric Greenhouse Effect

Erik Margan

Oddelek za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev
Institut Jožef Stefan
Ljubljana, Slovenija
<erik.margan@ijs.si>

POVZETEK

Toplogredni učinek ozračja je osnovni proces na katerem Medvladni odbor za podnebne spremembe (*Intergovernmental Panel for Climate Change*, IPCC) v svojih poročilih (*Assessment Reports*, AR) analizira izhodiščno stanje in napoveduje pričakovane podnebne spremembe, ter njihove posledice. Po njihovih ugotovitvah je segrevanje ozračja, ki ga beležimo v zadnjih 150 letih pretežno posledica človekovih dejavnosti, predvsem izpustov toplogrednih plinov v ozračje. Na osnovi pričakovanih sprememb IPCC pripravlja priporočila vladam s katerimi ukrepi bi omilili podnebne spremembe in blažili njihove posledice, ter ustrezno prilagodili zakonodajo za uveljavljanje in izvajanje teh ukrepov, čemur so se s svojimi podpisi Pariške pogodbe zavezale skoraj vse države članice Organizacije združenih narodov. Metodologija, ki jo uporablja IPCC za svoje analize in napovedi vsebuje vrsto napak. V tem prispevku se bomo omejili na nekaj resnih napak v oceni toplogrednega učinka v dokumentih IPCC, kar vzbuja močan dvom v pravilnost njihovih ugotovitev. Zaradi tega je človeški vpliv na podnebne spremembe in njihove pričakovane posledice močno precenjen, kar posledično zmanjšuje nujnost ukrepanja in sprejetja raznih predlaganih omejevalnih zakonov.

KLJUČNE BESEDE

Toplogredni učinek ozračja, podnebne spremembe, Stefan-Boltzmannov zakon, sevalno ravnovesje, povprečna globalna temperatura ozračja, vsebnost toplogrednih plinov.

ABSTRACT

The atmospheric greenhouse effect is the basis on which the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) in their Assessment Reports analyse the current climate and predict the expected climate changes and their consequences. In their estimate the atmospheric warming experienced during the last 150 years has been caused dominantly by human activities,

Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2024, 7–11 October 2024, Ljubljana, Slovenia

© 2024 Copyright held by the owner/author(s).

mainly by greenhouse gases emissions. Following the expected changes the IPCC prepares recommendations to governments to mitigate the climate changes and reduce their consequences, as well as adapt their legislation to implement those measures in accordance with the Paris Agreement signed by almost all countries members of the United Nations Organization. The methodology used by the IPCC for their analyses and predictions contains a number of errors. Here we show only some serious errors in the way the greenhouse effect has been presented in the IPCC documents, which rises a strong doubt in the correctness of their analysis. Because of those errors the human influence on climate is overestimated, as are their expected consequences, therefore the relevance and the necessity to mitigate them is reduced, as well as the urgency to adopt the proposed restrictive legislation.

KEYWORDS

Atmospheric greenhouse effect, climate change, Stefan-Boltzmann law, radiative balance, average global air temperature, concentration of greenhouse gases.

1 Uvod v fizikalno ozadje

Termodinamika je področje fizike, ki opisuje procese prenosa toplote med obravnavanimi telesi in njeni zakoni veljajo tako na molekularni kot na makroskopski ravni. Toplotna energija se manifestira v elektromagnetnih interakcijah med obravnavanimi telesi, kar pomeni, da obstajajo tesne povezave med notranjo energijo teles (v obliki kinetične energije, ki se izmenjuje ob trkih, ali pa kot lastne oscilacije in resonance zaradi vezalne energije med posameznimi atomi), ter absorbiranim ali emitiranim elektromagnetnim sevanjem, katerega energija (oziroma pripadajoča frekvenca) mora ustrezati določenemu molekularnemu rotacijsko-vibracijskemu kvantnemu stanju.

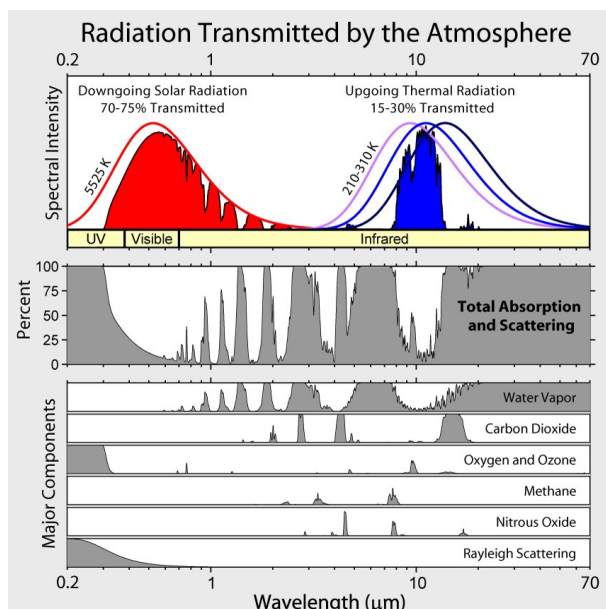
Za lažje razumevanje termodinamičnih procesov v ozračju je pomembno imeti v mislih dve spoznanji. Prvo je, da je energija fotonov (kvantov elektromagnetnega sevanja) kvantizirana in ustreza produktu Planckove konstante h in frekvence ν :

$$E = h\nu \quad (1)$$

Pri tem lahko molekula lahko absorbira sevanje na ustrezni frekvenci le, če pripadajoče kvantno stanje ni zasedeno. Absorbirano energijo pa molekula čez čas spontano emitira spet v obliki fotona z enako frekvenco, če pred tem ni bila izpostavljena drugim interakcijam.

Za absorpcijo je tudi pomembna nesimetrična oblika molekule, ker s tem zunanemu polju izkazuje električni dipolni moment. Dvoatomske molekule v ozračju (N_2 , O_2) so vedno simetrične in zato nimajo nizko-energijskih interakcij s sevanjem. Drugače pa je s triatomskimi molekulami. Na pr., pri vodni molekuli, H_2O , tvorita atoma vodika glede na atom kisika kot 105° , zato je polje molekularnega naboja elektronskih orbital nesimetrično. Molekula ogljikovega dioksida, CO_2 , pa ima simetrično obliko, atoma kisika tvorita z atomom ogljika dvojne vezi pod kotom 180° : $O=C=O$. Zato molekula CO_2 v osnovnem energijskem stanju nima dipolnega momenta in ne prihaja do interakcije s sevanjem. Po trku z neko drugo molekulo v ozračju pa se lahko del kinetične energije porazdeli med obe molekuli in se zaradi tega lahko vzbudi ena od možnih nihalnih in rotacijskih resonanc, odvisno od razpoložljive količine energije ob trku. Zaradi nihanja kisikovih atomov glede na ogljikov atom dobi molekula CO_2 za kratek čas nesimetrično obliko in nek določen dipolni moment in lahko absorbira foton ustrezne frekvence.

Na splošno imajo triatomske molekule več načinov nihanja, zato tudi več različnih resonančnih frekvenc, ki tvorijo karakteristični spekter posamezne molekule. V odvisnosti od rotacijskih osi pa resonance preidejo v ožji ali širši frekvenčni pas v okolici resonančne frekvence. Zato lahko te molekule zajamejo ali oddajo fotone z malenkostno drugačno frekvenco od osnovne. **Slika 1** prikazuje spektre molekul, ki jih vsebuje ozračje v različnih koncentracijah, v primerjavi s sevalnim spektrom sončevega in zemeljskega sevanja.



Slika 1: Absorpcijski spektri posameznih molekul v ozračju v primerjavi s sončnim in zemeljskim sevalnim spektrom.

Slika 1 je morda nekoliko zavajajoča, ker so spektri prikazani v odvisnosti od valovne dolžine. Energija sevanja pa je sorazmerna frekvenci in obratno sorazmerna valovni dolžini. Poleg tega pa je lestvica valovnih dolžin logaritemska, zato zgleda, kot da dolge valovne dolžine (nizke frekvence) nosijo več energije, v resnici pa je ravno obratno. Težava pa je tudi v tem, da so vsi prikazani spektri normirani na svoje maksimume, ki predstavljajo 100% učinka pri vrhu posameznega območja valovnih dolžin. Zato je primerjava učinkov med molekulami nekoliko otežena. Tretja težava pa nastopi zaradi različnih koncentracij molekul v ozračju, saj je verjetnost zajetja fotona odvisna tudi od koncentracije. Vse to je treba imeti v mislih kadar primerjamo posamezne spektre.

Poseben primer predstavlja vodna para, saj se posamezne molekule vode lahko povezujejo v različno velike aglomerate, od dveh molekul pa do makroskopskih kapljic. Posledično ima vodna para mnogo širši spekter in veliko število resonanc, mnogo večje od osnovnih šest za posamezno vodno molekulo.

Molekule CO_2 pa se med seboj ne povezujejo, ima pa ta molekula štiri izrazite resonance in sicer pri $1,9 \mu m$, $2,8 \mu m$, $4,2 \mu m$, ter $15 \mu m$. Prve tri se nahajajo v območju kjer je tako sončevo kot zemeljsko sevanje majhno, pa še delno se prekrivajo s spektrom vodne pare, katere koncentracija v nižjih plasteh ozračja je od 25 do 100 krat večja, zato je tam učinek CO_2 na segrevanje ozračja majhen. Dominanten učinek CO_2 je pri resonanci v območju okoli $15 \mu m$, ki je tudi delno prekrito s spektrom vodne pare.

Drugo pomembno spoznanje za razumevanje termodinamičnih procesov je v verjetnosti zajetja ali izsevanja fotonov in pogostosti trkov med posameznimi molekulami.

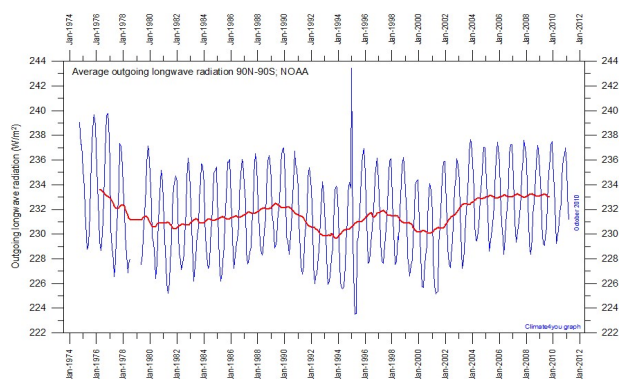
Če neka molekula zajame foton, ne more več zajeti drugega z enako frekvenco dokler se bodisi spontano ne znebi presežka energije z izsevanjem fotona z enako frekvenco, bodisi pa trči z neko drugo molekulo in se celotna energija obeh molekul porazdeli drugače, zaradi česar se prejšnje resonančno kvantno stanje sprosti. S tem pa tudi energija zajetega fotona preide v kinetično energijo molekul, kar pomeni povečano temperaturo ozračja, ponovna emisija fotona z enako frekvenco pa ni več možna. Tako zajeta energija ostane v ozračju dalj časa, saj se kinetična energija teh dveh molekul z nadaljnjimi trki porazdeli na vedno večje število molekul, nazadnje pa uide v vesolje kot sevanje pri valovnih dolžinah daljših od $50 \mu m$.

Če pa molekula zajame foton in ga kmalu zatem spet odda, se v ozračju ni spremenilo nič bistvenega, le energija je na svoji poti proti vesolju imela zamudo za delček sekunde.

Ozračje ni enakomerno gosto, saj gostota pada z nadmorsko višino, prav tako tudi pritisk in temperatura, zato je verjetnost da pride do trka z drugo molekulo zelo velika v spodnjih plasteh ozračja, z višino pa se verjetnost trka zmanjšuje. Zaradi tega je tudi verjetnost zajetja in oddaje fotona v spodnjih plasteh ozračja majhna, toplotna energija se prenaša pretežno s trki in premikanjem zraka. V bližini tal je povprečna prosta pot fotona v območju IR sevanja okoli 22 m. Pri svetlobni hitrosti to pomeni povprečno življenjsko dobo okoli 65 ns.

Po drugi strani pa je povprečna hitrost molekul enaka zvočni hitrosti, okoli 340 m/s. Pri normalni gostoti zraka $1,2 \text{ kg/m}^3$, ter povprečni molarni masi 28,8 vsebuje en kubični meter zraka okoli $2,5 \times 10^{25}$ molekul, katerih povprečna razdalja znaša okoli 10^{-8} m in je povprečni čas med trki $3 \times 10^{-11} \text{ s}$. To pomeni, da molekule le redko zajamejo foton, saj jih pri tem moti velika pogostost medsebojnih trkov. Teoretično izračunana verjetnost, da molekula odda odvečno energijo s sevanjem in ne s trkom je okoli 4%. Torej se toplotna energija v nizkih plasteh ozračja prenaša pretežno z molekularnimi trki.

Z višino se gostota zraka zmanjšuje, tudi pritisk in temperatura (hitrost, oziroma kinetična energija molekul), kar pomeni, da se postopoma povečuje verjetnost da molekula zajame foton, prav tako pa, da foton odda pred trkom z drugo molekulo. Približno na polovici gostote ozračja, to je na višini okoli 5,6 km, so razmere takšne, da je verjetnost spontane oddaje fotona približno enaka verjetnosti trka s drugo molekulo. Tam je povprečna prosta pot fotonov že okoli 2 km, kar pomeni da od tam fotoni lahko hitro uidejo izven ozračja. Zato s te višine tudi zaznamo največje število fotonov, oziroma največjo sevalno gostoto moči, kar merimo s sateliti kot sevanje Zemlje, **Slika 2**. To sevanje ima gostoto moči od okoli 232 W/m^2 , temu pa po Stefan-Boltzmannovem zakonu ustreza absolutna temperatura okoli 253 K (ali -20°C), kot bomo videli v nadaljevanju.



Slika 2: Satelitske meritve gostote moči povprečnega dolgovalovnega izstopnega sevanja Zemlje med letoma 1974 in 2012. Sezonska nihanja so znatna, v dolgoročnem povprečju pa ni trenda. Vir podatki: NOAA, po <http://climate4you.com>.

Z opisanim smo si ustvarili sliko, ki bo osnova za razumevanje problema učinka tople grede.

2 Toplogredni učinek ozračja

Običajno se kot idejni oče toplogrednega učinka ozračja navaja francoski matematik *Jean Baptiste Joseph de Fourier* (1768 – 1830). Kot topniški general v Napoleonovi vojski se je zanimal za izboljšanje natančnosti streljanja s topovi in zato tudi za vpliv temperature na širjenje materiala. Kasneje pa je svoje raziskave razširil še na druge materiale in pojave. Tako je med drugim pri opisu toplogrednega učinka zapisal [1]:

»... če preprečimo segretemu zraku, da se dviga in širi, ...«

Potem pa v nadaljevanju:

»Hkrati lahko opazimo zmanjšanje zajete stopnje toplote nad površino zemlje. Hitro gibanje zraka v vseh smereh, ki se tudi dviguje kadar se segreje, ter infra-rdeče sevanje v zraku, bosta zmanjšala intenziteto učinka, ki sicer nastane pod prozorno in gosto atmosfero, vendar to ne bo povsem izničilo tega učinka.«

Iz tega je očitno, da je Fourieru bilo povsem jasno, da v odprtem ozračju toplogredni učinek ne more biti enako močan, kot je denimo pod steklenim pokrovom zaprte posode. Žal so kasneje drugi raziskovalci (*J. Tyndall*, *S. Arrhenius*, in drugi) to njegovo sporočilo nekako spregledali.

Tako danes obravnavamo toplogredni učinek ozračja kot posledico zakona o ohranitvi energije, ter temu primernege sevalnega ravnovesja [2]: vstopno sončno sevanje, zmanjšano za delež, ki se odbija z vrhov oblakov in poledenelih površin, ter nekaj malega z ostalih površin, segreva površje, to pa potem segreva ozračje, ozračje pa potem seva proti vesolju. Dolgoročno povprečje vstopnega in izstopnega sevanja mora biti enako, razlika nastane lahko le zaradi slabše prepustnosti ozračja za sevanje, pri čemur se temperatura spreminja dokler se ne vzpostavi novo ravnovesje.

Sončno sevanje, izmerjeno s sateliti v zemeljski orbiti znaša povprečno $S_0 = 1361 \text{ W/m}^2$, kar imenujemo solarna konstanta, pa čeprav ni povsem konstanta. Zaradi sončeve aktivnosti se osončenost Zemlje spreminja v približno 11-letnih ciklih za okoli 0,2% (rekonstrukcija sončne aktivnosti zadnjih 400 let na podlagi sprememb koncentracije radioizotopov ^{14}C in ^{10}Be se zelo dobro ujema z zabeleženim številom sončnih peg); zaradi ekscentričnosti zemeljske orbite se spreminja za okoli 1,7%; zaradi premikanja težišča sončnega sistema glede na Sonce se spreminja za okoli 1%. Skupno znaša velikost sprememb blizu 3%, vendar se običajno domneva, da se vpliv večjih dveh sprememb v teku leta izravna. To pa ne drži povsem, saj je sprememba težišča odvisna predvsem od velikih planetov (Jupiter, Saturn), njuni orbitalni periodi pa se ne ujemata časovno z zemeljskim letom, posledično je ta vpliv s periodo 62 let odvisen od trenutne nagnjenosti Zemeljske rotacijske osi, saj južna polobla ima mnogo več oceanov kot severna, oceani pa veliko bolj absorbirajo toploto kot kopno.

Zato je neposreden vpliv spremembe v osončenosti na globalno povprečno temperaturo najbrž majhen, pa čeprav imamo zgodovinske dokaze, da nekakšen vpliv vendarle obstaja (srednjeveško toplo obdobje, mala ledena doba, predvsem pa Maunderjev in Daltonov minimum sončne aktivnosti se dobro ujemajo z zgodovinskimi podatki o lokalni klimi v Evropi).

Obstaja pa verjetnost, da Sonce vpliva na Zemljo posredno prek sprememb v sončevem magnetnem polju. Ob večji sončni aktivnosti je magnetno polje močnejše in bolj odklanja visokoenergetske kozmične delce, zaradi česar je v zemeljskem ozračju manj ionov in manj kondenzacijskih jeder okoli katerih se oblikujejo večje vodne kapljice oblakov. To teorijo zastopajo nekateri znani fiziki (*H. Svensmark*, Nobelovec *J. Clauser*, in drugi). Dejstvo je, da že zgolj 2% spremembe v oblačnosti ima podoben učinek kot učinek celotne količine CO_2 v ozračju (ne le človeškega deleža). Vendar ti vplivi niso tema tega članka in se z njimi tu ne bomo ukvarjali.

Kar pa nas tu zanima je način izračuna globalne povprečne temperature Zemlje. Zakonitost med sevanjem in temperaturo idealnega črnega telesa je prvi odkril fizik slovenskega rodu *Jožef Stefan* (1835 – 1893); ugotovil je, da je površinska gostota sevalne moči j^* sorazmerna četrti potenci absolutne temperature T (v Kelvinih), pomnoženi s Stefanovo konstanto σ :

$$j^* = \sigma T^4 \quad (2)$$

Pri tem je $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, kar je bilo sprva empirično določeno, kasneje pa je Stefanov učenec in sodelavec *Ludwig Boltzmann* (1844 – 1906) izpeljal to konstanto teoretično iz drugih osnovnih fizikalnih konstant:

$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / (15c^2 h^3) \quad (3)$$

kjer je Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \times 10^{-24} \text{ Ws/K}$, svetlobna hitrost v vakuumu $c = 299792458 \text{ m/s}$ in Planckova konstanta $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Ws/Hz}$.

Izraz (2) je zato znan kot Stefan-Boltzmannov zakon sevanja. Pripomniti je treba, da ta zakon velja za idealno črno telo segreto na temperaturo T , kar modeliramo kot sevanje majhne odprtine v veliki kavitaciji v termodinamičnem ravnovesju, tako da lahko izgubo energije skozi odprtino lahko zanemarimo. *Johann Heinrich Lambert* (1728 – 1777) je že leta 1760 ugotovil, da je gostota sevanja odvisna od kosinusa kota glede na normalo na določen površinski odsek, kar pomeni, da je sevanje maksimalno v smeri navpično na površino in nič v smeri vzporedno s površino. To je pomembno, ker sevanje po Stefan-Boltzmannovem zakonu računamo v pol-krogelnem prostorskem kotu 2π steradiana, za razliko od Planckovega zakona sevanja, ki ga ponavadi normiramo na kot enega steradiana. Dejansko je Stefan-Boltzmannov zakon integral Planckovega zakona po vseh možnih frekvencah. Planckov zakon nam podaja spektralno odvisnost sevanja (kot na **Sliki 1**).

Obrazec (2) nam omogoča izračun efektivnega sevanja zemeljskega površja, saj temperaturo lahko izračunamo iz povprečja meritev vseh svetovnih meteoroloških postaj v daljšem časovnem obdobju (Mednarodna meteorološka organizacija definira klimo kot povprečje vremena za najmanj 30 let). To povprečje znaša okoli 15°C , oziroma 288 K (kar je sicer zgolj statistični konstrukt, vendar sledimo metodi IPCC). Torej bo površinska gostota sevalne moči:

$$j^* = 5,67 \times 10^{-8} \times 288^4 = 390 \text{ W/m}^2 \quad (4)$$

Ta vrednost se močno razlikuje od vrednosti izmerjene s sateliti (**Slika 2**), kar pomeni, da se v ozračju del energije porabi za druge procese.

Če pa želimo določiti sevalno ravnovesje planeta, moramo upoštevati, da se del sončevega sevanja prav tako izgubi na svoji poti do tal. Znatno del sevanja se odbije od vrhnjih plasti oblakov in poledenelih površin (te imajo visoko odbojnost, *albedo*, za širok frekvenčni pas sončevega spektra), del pa se absorbira v ozračju (aerosoli, vodna para, itd.). Ocenjena povprečna vrednost albeda je 30%, oziroma $\alpha = 0,3$.

Poleg tega pa se del sevanja izgubi zaradi manjše emisivnosti tal. Vendar se za emisivnost večine snovi pri običajnih temperaturah jemlje vrednost med 0,95 in 1, zato naj bi ta vpliv bil majhen in se običajno ne upošteva (kar pa ni prav, saj je emisivnost odvisna tudi od razlike temperatur sosednih snovi).

Dnevna osončenost tal pa je seveda odvisna tudi od geometrije, saj imamo opravka s krogelno simetrijo planeta. Za kroglo pa je po Lambertu potrebno upoštevati kot sevanja v smeri sever-jug in vzhod-zahod, zato bomo imeli kvadrat kosinusa vpadnega kota. Če funkcijo $\cos^2\theta$ integriramo v pol-krogelnem območju kotov med $\pm 90^\circ$, dobimo rezultat $\frac{1}{2}$. Druga polkrogla planeta pa je v temi, zato imamo dodaten faktor $\frac{1}{2}$. Skupno torej v dolgoročnem povprečju celotno površje Zemlje dobi $\frac{1}{4}$ sončevega sevanja, zmanjšane za albedo. Za vstopno sevanje torej velja naslednja enačba:

$$j^* = S_0(1-\alpha)/4 \quad (5)$$

Ker pa mora veljati zakon o ohranitvi energije, lahko izraza (2) in (5) izenačimo in iz tega izračunamo teoretično povprečno temperaturo planeta:

$$T = [S_0(1-\alpha)/4\sigma]^{1/4} \quad (6)$$

Ko vstavimo ustrezne številke, dobimo $T = 255 \text{ K}$, ali -18°C . To pa je zelo blizu vrednosti izmerjene s sateliti za sevalno območje na nadmorski višini 5,6 km, kjer smo ob **Sliki 2** izračunali -20°C . Lahko rečemo da gre le za višinsko razliko okoli 300m.

Iz tega pa pri IPCC izvelečajo naslednji (vprašljiv!) sklep: če je temperatura tal 288 K in sevalna temperatura planeta 255 K pomeni, da mora biti toplogredni učinek ozračja 33 K. Iz tega potem sledi, da mora biti klimatska občutljivost na vsebnost toplogrednih plinov zelo velika. Za to občutljivost (znano kot *equilibrium climate sensitivity*, ECS) ocenjujejo, da mora biti najverjetneje v območju med 2 in 5°C za vsako podvojitve koncentracije toplogrednih plinov.

Vendar pa laboratorijske meritve optične prepustnosti CO_2 v okolici dominantne resonance $15 \mu\text{m}$ valovne dolžine kažejo na le $1,1^\circ\text{C}$ za vsako podvojitve koncentracije CO_2 . Gre za logaritično zakonitost, ki je bila empirično določena in ustreza relaciji $\Delta F = 5,35 \ln(C/C_0)$, kjer je ΔF sevalno »siljenje« (*forcing*, kar je pomanjkljivo imenovano, saj znak Δ pomeni spremembo), \ln pa je naravni logaritem (po bazi $e = 2,71828\dots$) razmerja med novo koncentracijo C in začetno koncentracijo C_0 ; za podvojitve koncentracije pa velja $C/C_0 = 2$, torej bo:

$$\Delta F = 5,35 \ln(2) = 5,35 \times 0,693 = 3,7 \text{ W/m}^2 \quad (7)$$

Posledično za spremembo temperature velja relacija:

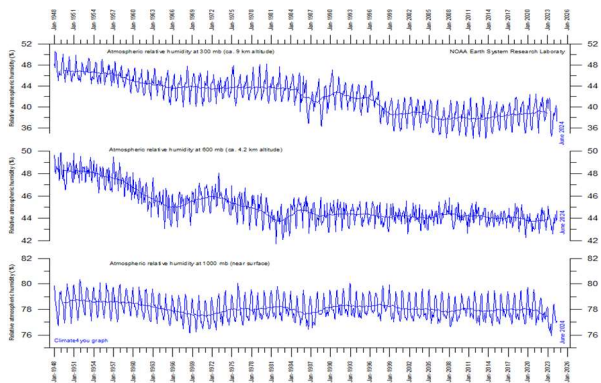
$$\Delta T_p = \Delta F \{T_p / [S_0(1-\alpha)]\} \quad (8)$$

kjer je temperatura površja $T_p = 288 \text{ K}$. Zato je sprememba temperature za podvojitve koncentracije CO_2 enaka le $1,1^\circ\text{C}$.

Ker se vrednosti za območje ECS ne ujemajo s ΔT_p , si pri IPCC pomagajo z domnevo o obstoju pozitivne povratne zanke prek

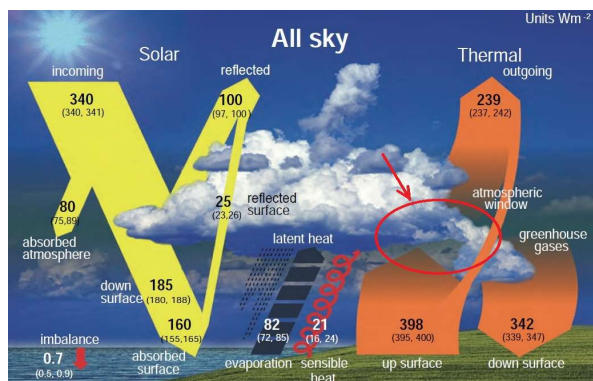
vodne pare, ki naj bi ojačala učinek CO₂ za približni faktor 3×. Razlaga gre nekako takole: ozračje, segreto zaradi povečanja vsebnosti CO₂, lahko sprejme več vlage (7% več za vsako 1°C po Clausius-Clapeyronovi relaciji), zato se zrak še bolj segreje, ter lahko sprejme še več vlage, in tako v krog, dokler se ne vzpostavi novo sevalno ravnovesje.

Vendar meritve zračne vlažnosti (relativne in absolutne) ne potrjujejo te domneve, kot je razvidno na **Sliki 3**, na kar je leta 2023 opozoril tudi Nobelovec John Clauser, pa je takoj doživel hude kritike z vseh strani, a povsem neupravičeno.



Slika 3: Satelitske meritve zračne vlažnosti na različnih višinah med januarjem 1948 in junijem 2024. Vir podatkov NOAA, povzeto po <<http://climate4you.com>>.

Na podlagi vseh predstavljenih formul so pri IPCC konstruirali sicer dokaj zapleten fizikalni model procesov v ozračju, kar pa zelo poenostavljeno prikazuje **Slika 4**:



Slika 4: Pretoki sevalne moči v zemeljskem ozračju. Številke predstavljajo gostote sevalnih moči posameznih procesov v enotah W/m². Vendar v območju označenem z rdečo elipso manjka pomemben podatek! Vir: IPCC AR6 [3].

Parametre modela določa 12 števil (v oklepajih so navedene meje območja zanesljivosti), pri čemur vpadno kratkovalovno sončno sevanje na levi in izstopno dolgovalovno zemeljsko sevanje na desni približno ustrežata prej izračunanim številkam: četrtnina sončnega sevanja ($1361/4 = 340,25 \text{ W/m}^2$) zmanjšana za albedo, ter nekaj absorpcije v ozračju, segreva tla s kakšnih 160 W/m^2 , zemeljsko površje izseva okoli 398 W/m^2 (mi smo izračunali 390), ozračje pa izseva kakšnih 239 W/m^2 v vesolje (sateliti sicer izmerijo le 232 W/m^2).

Dopustimo lahko, da senzorji satelitov ne zajemajo celotnega frekvenčnega območja, zato lahko nastopi znatna razlika med 232 W/m^2 na **Sliki 2** in 239 W/m^2 na **Sliki 4**. Precej nelogično pa se zdi, da se v sistemu pretaka veliko več energije kot v sistem vstopa in izstopa, saj zglada kakor da bi hladno osrednje ozračje, ki je pri -18°C , z dobrimi 342 W/m^2 dodatno segrevalo tla, ki so na $+15^\circ\text{C}$, pa čeprav efektivni pretok navzgor ustreza razliki med 398 in 342 W/m^2 . Matematično se sicer številke ujemajo, toda fizikalno je nesmiselno, če sistem, ki naj bi bil v termodinamičnem ravnovesju z okolico, vsebuje precej več energije kot vanj priteka in odteka. To nakazuje, da z načinom izračuna, oziroma ocenami posameznih parametrov sistema, kot jih privzema IPCC, mora biti nekaj hudo narobe.

Vendar to ni edina težava. V **Sliki 4** na mestu označenem z rdečo elipso manjka trinajsti (nesrečni?) podatek. Označba *greenhouse gases*, oziroma toplogredni plini sicer naznanja, da se tam dogaja nekaj pomembnega in da ti plini sevajo nazaj proti tlom 342 W/m^2 , ni pa podatka o razliki med sevanjem tal in sevanjem višjih plasteh ozračja proti vesolju, kar je dejansko **definicija toplogrednega učinka!**

Seveda to lahko izračuna vsakdo sam iz podatkov na **Sliki 4**: $398 - 239 = 159 \text{ W/m}^2$. Vendar te oznake v grafu ni, ker bi se kdo spraševal kako lahko $398 + 80 - 342 = 136 \text{ W/m}^2$ ustreza 159 W/m^2 ? Ker se namreč tistih 82 in 21 W/m^2 v resnici porabi za mehansko delo, transport toplega in vlažnega zraka navzgor.

Nekakšno razlago vendarle najdemo v besedilu poročila IPCC AR6 in sicer v poglavju 7.4.2.1 Planck Response, **Slika 5**:

7.4.2.1 Planck Response

The Planck response represents the additional thermal or longwave (LW) emission to space arising from vertically uniform warming of the surface and the atmosphere. The Planck response α_p , often called the Planck feedback, plays a fundamental stabilizing role in Earth's climate and has a value that is strongly negative: a warmer planet radiates more energy to space. A crude estimate of α_p can be made using the normalized greenhouse effect \tilde{g} , defined as the ratio between the greenhouse effect G and the upwelling LW flux at the surface (Raval and Ramanathan, 1989). Current estimates (Section 7.2, Figure 7.2) give $G = 159 \text{ W m}^{-2}$ and $\tilde{g} \approx 0.4$. Assuming \tilde{g} is constant, one obtains for a surface temperature $T_s = 288 \text{ K}$, $\alpha_p = (g - 1) 4 \sigma T_s^3 \approx -3.3 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, where σ is the Stefan-Boltzmann constant. This parameter α_p is estimated more accurately using kernels obtained from meteorological reanalysis or climate

Simbol G

Vrednost 159 W/m²

Prva omemba SBZ

Slika 5: Iz poročila IPCC AR6, leta 2021; vir [4].

Kot opozarja prof. *Howard Hayden* [4], je to prvič po več kot 30 letih delovanja IPCC, da so toplogrednemu učinku dali simbol G , mu določili vrednost, $G = 159 \text{ W/m}^2$, ter prvič eksplicitno omenili Stefan-Boltzmannov zakon!

Pa pogledjmo kako se izide izračun sevalnega ravnovesja. Ta določa, da mora biti izstopno sevanje zemlje, j_z , enako vstopnemu sončnemu sevanju j_s :

$$j_z = j_s \tag{9}$$

Hkrati pa mora biti izstopno sevanje j_z enako razliki med sevanjem površine tal j_p , in toplogrednim učinkom G :

$$j_z = j_p - G \quad (10)$$

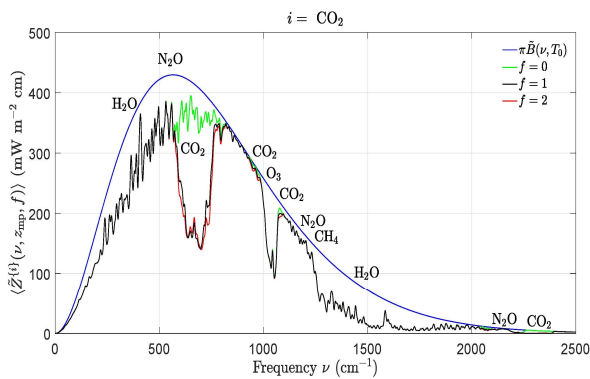
Iz (9) in (10) sledi, da mora biti tudi vstopno sončevo sevanje enako razliki med sevanjem tal in toplogrednim učinkom:

$$j_s = j_p - G \quad (11)$$

To pa si lahko predstavimo tudi grafično s Planckovimi spektri. Planckov spekter sevanja tal je mogoče teoretično izračunati s pomočjo Planckove relacije za odvisnost od valovne dolžine, kjer namesto frekvence uporabimo $\lambda = c/v$:

$$j_p(\lambda, T) = (2hc^2\lambda^{-5}) / (e^{hc/\lambda kT} - 1) \quad (12)$$

Povprečno globalno temperaturo tal smo že določili: $T = 288$ K. Za valovne dolžine pa vzamemo območje med 1 in 100 μm , kar je območje znotraj katerega je sevalni maksimum za to temperaturo (pri okoli 10 μm). Dovolj dobro ločljivost dobimo, če za korak pri valovnih dolžinah vzamemo $d\lambda = 0,1$ μm . Potem spektralna funkcija zgleda kot modra krivulja na **Sliki 6**:

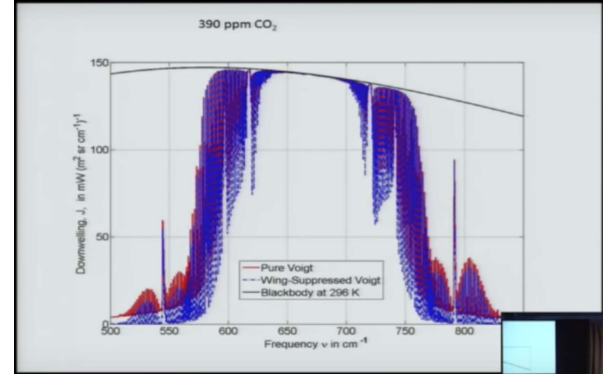


Slika 6: Spekter sevanja tal (modra krivulja) za temperaturo $T = 288$ K po enačbi (12), v primerjavi s spektralno absorpcijo ozračja: črna krivulja je skupni spekter plinov ob sedanji vsebnosti CO_2 , zelena krivulja je za primer brez CO_2 , rdeča krivulja pa predstavlja učinek podvojitve vsebnosti CO_2 . Na horizontalni osi je prostorska frekvenca v številu valov na cm.

Spekter izstopnega sevanja planeta pa je mogoče bodisi izmeriti s sateliti, bodisi izračunati na podlagi empiričnih podatkov za posamezne pline v ozračju, ki so zbrani v podatkovni zbirki HITRAN, kot sta to naredila van Wijngaarden in Happer [5]. Črna krivulja na **Sliki 6** iz njihove študije velja za sedanjo vsebnost CO_2 v ozračju. Površina pod posamezno krivuljo je enaka izračunanim gostotam sevalne moči za sevalne gostote iz enačbe (11).

Iz **Slike 6** je razvidno, da podvojitve današnje koncentracije CO_2 ne bo privedla do večjih sprememb globalne povprečne temperature, saj je razlika med rdečo in črno krivuljo zelo majhna, znaša manj kot 2% celotnega absorbiranega sevanja v okolici dominantne resonance CO_2 , ki je pri 15 μm , oziroma v okolici 666 valov na cm na horizontalni lestvici. To je posledica dejstva, da je spekter CO_2 že pri sedanji koncentraciji nasičen, ker preprosto ni več fotonov, ki bi jih lahko pri povečani

koncentraciji zajel. To je razvidno na bolj podrobnem prikazu spektra na **Sliki 7**, kjer je vrh ostro omejen z gostoto sevanja tal, oscilacije pa so prisotne le na robovih spektra. Pri podvojeni koncentraciji bi se povečala le strmina robov, ker je pač absorpcijska energija kvantizirana z jakostjo medatomske vezi CO_2 , in spekter nima možnosti, da bi se še bolj razširil.



Slika 7: Podrobnejši prikaz spektra CO_2 v območju okoli dominantne resonance pri 15 μm , oziroma 666 valov na cm.

Vendar pa imamo še en pomembnejši dokaz, da so pri IPCC napačno ocenili učinek toplogrednih plinov. S pomočjo **Slike 6** in enačbe (11) lahko to nazorno pokažemo.

$$j_s = j_p - G$$

Figure 8: A graphical representation of the equation $j_s = j_p - G$. It shows three yellow curves on a black background. The first curve is the total outgoing radiation j_s . The second curve is the incoming radiation j_p . The third curve is the greenhouse effect G . The equation is written as $j_s = j_p - G$ with the minus sign between j_p and G .

Slika 8: Prikaz enačbe (11) v grafični obliki.

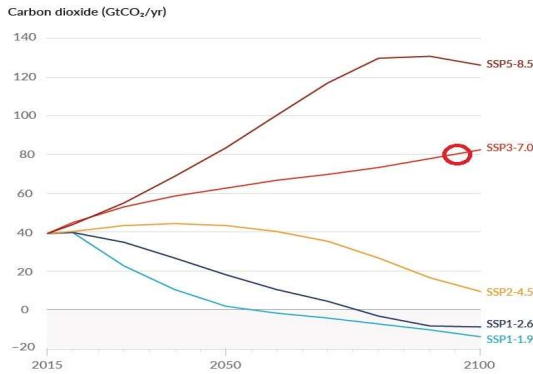
Ker se vstopno sončevo sevanje j_s skoraj konstantno, se tudi izstopno sevanje j_z dolgoročno ne spreminja s koncentracijo CO_2 (kot potrjuje tudi **Slika 2**). To pomeni, da mora biti sprememba G natančno enaka spremembi sevanja površine, j_p . Za podvojitve koncentracije CO_2 smo že z enačbo (7) izračunali spremembo gostote sevalne moči, ta prispeva 3,7 W/m^2 . Za toliko bi se v teh okoliščinah povečal tudi toplogredni učinek G .

Vendar pri IPCC podajajo drugačno oceno, pravzaprav več različnih ocen odvisno od posameznega scenarija znižanja izpustov toplogrednih plinov. Ti scenariji se v AR6 imenujejo *Shared Socio-economic Pathways*, SSP. Vsakemu SSP scenariju so dodelili drugačno stopnjo znižanja izpustov, učinek pa so potem označili z dvema številoma, prvo število pomeni predvideni porast temperature, drugo število pa je pripadajoče povečanje gostote sevalne moči.

Za zgled vzemimo SSP3-7.0, (**Slika 9** in **Slika 10**) ki v AR6 predstavlja primer, ko bi se izpusti še naprej povečevali po sedanji stopnji in za njihovo zmanjševanje ne bi naredili ničesar (temu scenariju pravijo *Business As Usual*). Predvidevajo da bi se v tem primeru količina izpustov CO_2 podvojila leta 2095.

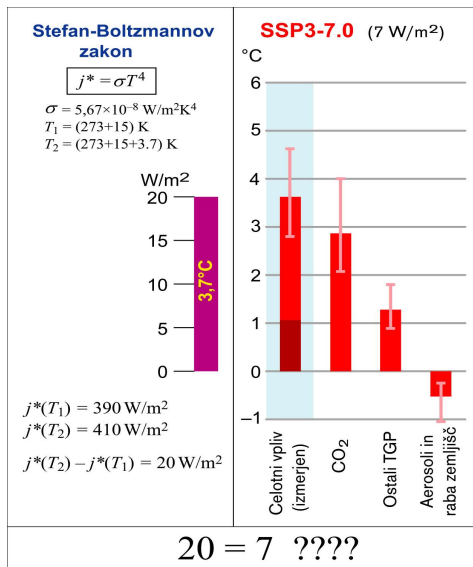
Torej bi se od leta 2015 do leta 2095 izpusti povečali s sedanjih 40 na 80 milijard ton na leto. Ta prirast pomeni vsako leto

dodatnih 0,5 milijarde ton CO₂. Toda meritve vsebnosti CO₂ zadnjih 60 let kažejo, da ta narašča za polovico počasneje kot naraščajo izpusti, saj polovico sproti posrkajo naravni ponori (oceani in fitoplankton, kopenske rastline in bakterije v tleh). Sedanja celotna količina CO₂ v ozračju znaša 3200 milijard ton. Če torej vsako leto v ozračju ostaja dodatnih 0,25 milijarde ton, bi ob sedanji stopnji rasti izpustov skupno količino CO₂ podvojili v 65 letih od leta 2015, oziroma že leta 2080.



Slika 9: Predvideni scenariji zmanjševanja izpustov po IPCC. Scenarij SSP3-7.0 predvideva nadaljnje povečevanje izpustov po sedanji letni stopnji, kar naj bi leta 2095 privedlo do podvojitve letne količine izpustov (rdeči krogec).

Kako verjetni so ostali scenariji najbrž nima smisla razpravljati. Poglejmo bilanco sevalne moči za SSP3-7.0 po oceni IPCC. Predvideva se najverjetnejši porast temperature za 2,6°C (oziroma najverjetneje v območju med 2 in 5°C) nad sedanjo temperaturo, ki je že za 1,1°C višja od temperature leta 1850, skupno torej 3,7°C; to pa naj bi ustrezalo povečani gostoti sevalne moči za 7 W/m², **Slika 10:**



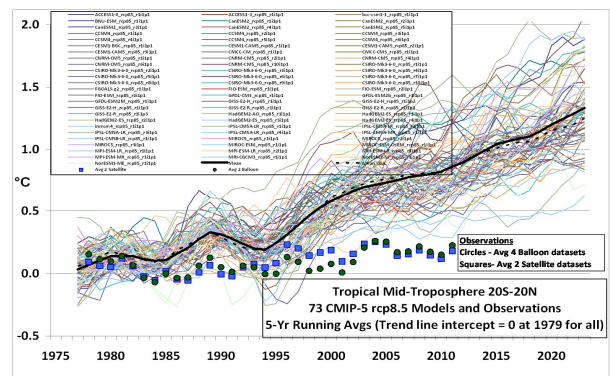
Slika 10: Na desni polovici slike je scenarij SSP3-7.0, povzet po AR6, str. 13 [6]. Na levi pa je izračun gostote sevalne moči za predvideno temperaturno razliko po Stefan-Boltzmannovem zakonu. Številke se ne ujemajo.

Kot vidimo na desni strani **Slike 10**, znaša izmerjeno povečanje povprečne globalne temperature od leta 1850 do danes okoli 1,1°C, nad tem pa je dodano najverjetneje povečanje v primeru podvojitve celotne količine CO₂ v ozračju, kar je ocenjeno na 2,6°C, skupno torej 3,7°C. Od tega odpade samo na CO₂ okoli 2,9°C, ostali toplogredni plini prispevajo še 1,3°C, izpusti aerosolov pa ohladijo ozračje za okoli 0,5°C. Po scenariju SSP3-7.0 se to povišanje temperature zgodi zaradi povečanega toplogrednega učinka za 7 W/m².

Toda po Stefan-Boltzmannovem zakonu povišanju temperature za 3,7°C ustreza povečanje gostote sevalne moči za 20 W/m².

Kako je lahko 20 = 7? Na to vprašanje ni odgovora. Sklepamo lahko le, da pri IPCC že v osnovi niso pravilno zastavili problema in je model na **Sliki 4** vsaj pomanjkljiv, če že ne povsem napačen, pa tudi to, da se nihče ni potrudil preveriti kako se sedanje sevalno ravnovesje planeta ujema s tistim predvidenim za primer podvojitve vsebnosti CO₂ v ozračju.

Dodatna težava je, da je ta napaka v klimatski občutljivosti za faktor 3× vgrajena v vse računalniške klimatske modele in so posledično vse napovedi rasti temperature do konca tega stoletja močno pretirane. To dejstvo je bilo očitno že leta 2010, ko sta dr. Roy Spencer in dr. John Christy zbrala in objavila napovedi rasti temperature 73 računalniških klimatskih modelov, ter jih primerjala s temperaturami izmerjenimi do leta 2010 s sateliti in meteorološkimi baloni, **Slika 11:**



Slika 11: Napovedi rasti globalne temperature 73 računalniških klimatskih modelov od leta 1978 do leta 2023 v primerjavi z izmerjenimi temperaturami do leta 2010 (tenke črte so napovedi potekov temperatur posameznih modelov, debelejša črna črta je njihovo 5-letno povprečje, modri kvadratici predstavljajo letna povprečja satelitskih meritev, črni krogi pa so meritve z meteorološkimi baloni).

Žal ta napaka ni brez posledic tudi v realnem svetu, gre namreč za verjetno najdražjo računsko napako v zgodovini človeštva. Zaradi te napake je bilo do sedaj na svetovni ravni po nepotrebnem zapravljeno po grobi oceni več kot 18 bilijonov ameriških dolarjev (samo v Nemčiji je bilo za njihov program *Energiewende* v 15 letih porabljenih okoli 600 milijard evrov, v ZDA pa 3800 milijard dolarjev). Posredna škoda pa je še mnogo večja, saj je zaradi tega bilo po svetu ustavljenih veliko investicij v energetske, industrijske in kmetijske razvoj, kar bi prineslo velik

družbeni napredek, še zlasti v državah v razvoju bi to v veliki meri pripomoglo k zmanjšanju revščine in lakote.

3 Zaključek

Izračuni s katerimi IPCC, za njimi pa pretežni del svetovne politike in množičnih medijev ustrahujejo prebivalstvo s posledicami prihodnjih podnebnih sprememb in posledično upravičujejo uvajanja raznih omejitvenih ukrepov s ciljem zmanjševanja izpustov toplogrednih plinov, vsebujejo številne napake. Nekaj najbolj resnih je opisanih v tem članku, izračuni dokazujejo, da je ocenjen vpliv toplogrednih plinov na podnebje prevelik vsaj za faktor $3\times$. Zaskrbljujoče je, da se o teh napakah ne govori niti v znanstvenih krogih, pa je ravno znanost tista, ki bi morala vse tovrstne teoretične predpostavke in na njih zasnovane izračune sproti temeljito preverjati in morebitne napake odpravljati. Da se to ne dogaja je najbrž posledica dejstva, da so tudi mnogi znanstveniki podlegli političnim pritiskom in grožnjam z omejevanjem financiranja znanstvenih raziskav tako samim znanstvenikom kot njihovim institucijam, če bi javno dajali izjave, ki ne soglašajo z uradnimi političnimi opredelitvami do problemov vpliva na podnebje. To seveda ne pomeni, da vpliva človeških dejavnosti na podnebje ni. Vendar bi morali biti ti vplivi realno ocenjeni, morebitni nujni omejevalni ukrepi pa temeljito pretehtani in sorazmerni, predvsem pa naj ne bi povzročali več škode kot koristi.

ZAHVALA

Avtor se zahvaljuje Vladimirju Alkalaju in Rafaelu Mihaliču za pomoč pri strokovnem pregledu in preverjanju besedila.

IZJAVA

Avtor za ta članek ni prejel nobene finančne ali kakršne koli druge podpore javnih institucij ali privatnih organizacij. Stališča in strokovne ugotovitve izražene v članku so izključno sad avtorjevih izračunov na podlagi javno dostopnih izmerjenih podatkov in pregledovanja svetovne literature na tem področju in ne izražajo uradnih stališč ali opredelitev ustanove v kateri je avtor zaposlen.

VIRI

- [1] J. Fourier, 1827: MEMOIRE sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires; (prevod v angleščino: W. M. Connolley) <http://www.wmconnolley.org.uk/sci/fourier_1827/fourier_1827.html>
- [2] S. Manabe, F. Möller: On the Radiative Equilibrium and Heat Balance of the Atmosphere, Monthly Weather Review, Vol. 89, Num. 12, Dec. 1961 <<http://docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/089/mwr-089-12-0503.pdf>>
- [3] Šesto poročilo IPCC: AR6, Ch.7, Figure 7.2, str. 934 (2021), <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>>
- [4] Howard Hayden, Ph.D.: The Magic Trick of Climate Science. <<https://www.youtube.com/watch?v=kIWJQBY-xnE>>
- [5] W. A. van Wijngaarden, W. Happer: Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant Greenhouse Gases, June 8, 2020, <<https://arxiv.org/pdf/2006.03098.pdf>>
- [6] Šesto poročilo IPCC: AR6, SPM, Figure SPM.4, str. 13 (2021), <<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>>